



Túneles de Pajares

El guiado de las tuneladoras de los túneles de Pajares

Ángel L. Navarro Rodríguez
Juan F. Prieto Morín
Jesús Velasco Gómez

AUTORES

Ángel L. Navarro Rodríguez
FCC CONSTRUCCIÓN, S. A.

Juan F. Prieto Morín
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (UPM)

Jesús Velasco Gómez
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (UPM)

COLABORADORES

Iván Bélmar Flórez
XYZ, S. A.

Julio García López
SACYR, S. A.

F. Javier Martín de la Iglesia
FCC CONSTRUCCIÓN, S. A.

Luis M. Toledano García
ACCIONA INFRAESTRUCTURAS, S. A.

José Luis Valbuena Durán
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

El guiado de las tuneladoras de los túneles de Pajares

1. INTRODUCCIÓN

El 19 de abril de 2002 en las oficinas centrales de la delegación de Transportes de FCC, se celebró una reunión en la que participaron la gerencia y los responsables de topografía de las empresas que constituían la UTE que acometería los trabajos de la mitad Norte de los Túneles de Guadarrama. En dicha reunión, Pedro Arranz Chacón, jefe de topografía de dicha UTE, expuso la recopilación de trabajos topográficos y geodésicos que se habían realizado en otras obras de similares características, principalmente el túnel de San Gotardo y el Eurotúnel, discutiéndose su aplicación, la instrumentación a emplear y las metodologías a seguir.

Con lo acordado en dicha reunión se confeccionó un documento que dibujaba la metodología, la instrumentación y el modelo de gestión para afrontar los trabajos topográficos que deberían encaminar al éxito, desde el punto de vista geométrico, la ejecución de los Túneles de Guadarrama, obra en ese momento sin precedente en España. Lo propuesto se trasladó a los responsables de las obras de la mitad Sur del Túnel, asumiéndose para todo el proyecto por común acuerdo.

A partir de ese momento Pedro Arranz, el resto de jefes de topografía implicados en la obra y los equipos de asesores que intervinieron, tomaron de forma coordinada el control en la materia, desarrollando unas metodologías que, llevadas a la práctica, desembocaron en lo que fue el notable éxito geométrico en la ejecución de los Túneles de Guadarrama, hoy ya en servicio.

En 2004, cuando se iniciaron los trabajos para la ejecución de los Túneles de Pajares, obra de características similares a las de los Túneles de Guadarrama, con una problemática ingenieril mayor si cabe debido entre otros factores a la complejidad geológica del macizo a atravesar, se tomó como referencia el trabajo de Guadarrama en muchos sentidos y ámbitos, entre ellos el geodésico y el topográfico, aplicando, evolucionando y mejorando en muchos casos las técnicas desarrolladas anteriormente.

Este texto pretende sintetizar lo que se considera esencial e importante del trabajo topográfico realizado en los Túneles de Pajares, desde la satisfacción del éxito obtenido y con la intención de transmitir su experiencia a proyectos futuros.

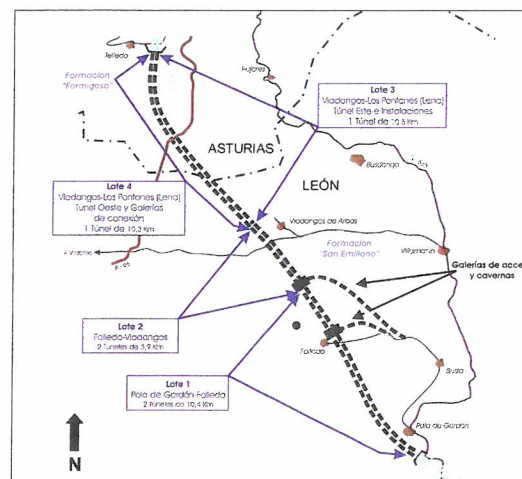
2. EL TRAZADO DE LOS TÚNELES DE PAJARES

El trazado de las líneas de ferrocarril de Alta Velocidad debe cumplir unos condicionantes muy estrictos con el fin de poderse desarrollar la altas prestaciones de los trenes en condiciones de seguridad y confort para los viajeros.

Tanto en planta como en alzado, los parámetros de las curvas y de los acuerdos están definidos por números muy grandes, con el fin de compensar la aportación de la velocidad a las acciones a las que somete el material móvil a la superestructura, y las correspondientes reacciones de ésta. Asimismo las transiciones desde las alineaciones rectas a dichas curvas han de ser progresivas, con el fin de hacerlas lo suficientemente imperceptibles tanto desde el punto de vista mecánico, como desde el punto de vista del confort.

Los túneles de Pajares, formados por dos tubos paralelos de 24,7 km de longitud cada uno, constituyen la obra más singular de la Variante de Pajares, de 49,7 km de longitud total, que comprende el nuevo acceso ferroviario de alta velocidad de la Meseta Septentrional a la Cornisa Cantábrica, desde La Robla en la provincia de León hasta Pola de Lena en el Principado de Asturias.

Figura 1. Esquema geográfico de los Túneles de Pajares



El trazado en planta de los túneles viene definido por los ejes de las dos vías, derecha e izquierda en sentido León-Asturias. Estos ejes se inician en las proximidades del núcleo urbano de La Pola de Gordón (provincia de León), concretamente en el punto kilométrico PK 9+440 de la Variante, y tienen un desarrollo total de 25 km, finalizando en el PK 34+394, en las proximidades de la población de Telledo, en el término municipal de Lena (Principado de Asturias).

La distancia entre ejes a lo largo del trazado es constante (50 m), excepto en su tramo inicial (del PK 9+440 al PK 12+063 de la vía derecha) que es variable (desde 7,7 m en el exterior, hasta 50 m). Esto es debido a que es necesario realizar una transición desde el túnel previo de Nocedo de Gordón, por ser de vía doble. Además, debido a condicionantes geotécnicos, en el emboquille sur ha sido preciso establecer una separación entre ejes superior a 20 m. La transición se realizó modificando la vía izquierda, condicionando su trazado tanto en planta como en alzado.

El trazado en planta de los túneles está constituido en su mayor parte por alineaciones rectas que se enlazan con alineaciones circulares, que permiten la circulación a una velocidad máxima de 350 km/h.

El trazado en alzado se corresponde con los ejes definidos en planta y representa el hilo

bajo (carril de cota inferior) alrededor del cual girará el peralte de la vía. La rasante que se proyectó vino condicionada, por un lado, por el cruce sobre el río Huerna, en el lado asturiano, y por otro, por los enlaces con la vía actual tanto en La Robla como en Pola de Lena, y los puestos de adelantamiento y estacionamiento de trenes (PAET) de Campomanes y La Robla (apartaderos que permiten el rebalse de trenes más lentos y el estacionamiento de trenes por razones de mantenimiento o seguridad). Teniendo en cuenta estos factores, la pendiente longitudinal resultante en los túneles de Pajares es de 16,8 milésimas. El cruce sobre el río Huerna se realiza de forma que el resguardo entre la altura de la lámina de agua que pueda producirse para el período de retorno de 500 años y la obra de paso proyectada sea superior a 1,5 m.

En el PK 17+375 (vía derecha) se inicia una galería de 2.087 m, denominada Galería de Folledo, que permite el acceso directo a los túneles desde el exterior.

Asimismo en el PK 20+158 se inicia otra galería de 5.451 m, que también permite el acceso a los túneles, además de haber servido para que una de las tuneladoras ejecutase el tramo intermedio del túnel este.

Se han considerado tres posibles escenarios de explotación:

- *Escenario I:* se considera una velocidad de los trenes lentos (mercancías) a 160 km/h, aprovechando la velocidad máxima que permite cada curva con el objetivo de alcanzar los 350 km/h, y con un mínimo de 220 km/h.
- *Escenario II:* se considera una velocidad de los trenes lentos (mercancías) a 100 km/h, aprovechando la velocidad

máxima que permite cada curva con el objetivo de alcanzar los 350 km/h, y con un mínimo de 220 km/h.

- *Escenario III:* se considera una velocidad de los trenes lentos (mercancías) a 50 km/h, aprovechando la velocidad máxima que permite cada curva con el objetivo de alcanzar los 350 km/h, y con un mínimo de 220 km/h.

A cada uno de estos escenarios le corresponde un rango de velocidades máximas específicas. Las velocidades más elevadas, y por tanto las más exigentes a la hora de diseñar la infraestructura, son las correspondientes al escenario I. En consecuencia, el conjunto de la actuación se ha ideado para una velocidad mínima (trenes de mercancías) de 160 km/h, lo que es compatible con la explotación de la infraestructura a 100 y 50 km/h, previa modificación de los peraltes de las curvas.

2.1. Criterios de diseño en la definición del trazado

A continuación se exponen los criterios de diseño que justifican los parámetros geométricos utilizados en la definición del trazado. Estos criterios se tomaron de las Instrucciones y Recomendaciones para redacción de los Proyectos del GIF, actual ADIF.

Planta

Para los tres escenarios definidos se han considerado los siguientes valores de peralte, insuficiencia, exceso y aceleración sin compensar:

Tabla 1. Peraltes según los escenarios de explotación definidos

| | 200 \geq Vmax (km/h) > 250 | | 200 \geq Vmax (km/h) > 300 | | 300 \geq Vmax (km/h) > 350 | |
|--|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|
| | Normal | Excepcional | Normal | Excepcional | Normal | Excepcional |
| Peralte máximo (h) | 140 mm | 160 mm | 140 mm | 160 mm | 140 mm | 160 mm |
| Máxima insuficiencia de peralte (hi) | 80 mm | 100 mm | 70 mm | 80 mm | 60 mm | 65 mm |
| Máximo exceso de peralte (he) | 80 mm | 100 mm | 80 mm | 100 mm | 80 mm | 100 mm |
| Máxima aceleración sin compensar (Asc) | 0,52 m/s ² | 0,65 m/s ² | 0,46 m/s ² | 0,52 m/s ² | 0,39 m/s ² | 0,42 m/s ² |

Clotoides

Las curvas de transición se han dimensionado con el fin de obtener las velocidades máximas de cada curva por tramos homogéneos, teniendo en cuenta los siguientes criterios:

Tabla 2. Pendientes según los escenarios de explotación definidos

| | 200 \geq Vmax (km/h) > 250 | | 200 \geq Vmax (km/h) > 300 | | 300 \geq Vmax (km/h) > 350 | |
|--|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|
| | Normal | Excepcional | Normal | Excepcional | Normal | Excepcional |
| Máxima pendiente del diágrama de peraltes (i _o) | 0,7 mm/m | 2,0 mm/m | 0,5 mm/m | 2,0 mm/m | 0,5 mm/m | 2,0 mm/m |
| Máxima variación del peralte (u _o) | 40 mm/s | 60 mm/s | 30 mm/s | 50 mm/s | 30 mm/s | 50 mm/s |
| Máxima variación de la insuficiencia de peralte (Wo) | 50 mm/s | 75 mm/s | 40 mm/s | 60 mm/s | 30 mm/s | 50 mm/s |
| Máxima variación de la aceleración sin compensar (y _o) | 0,33 m/s ² | 0,49 m/s ² | 0,29 m/s ² | 0,39 m/s ² | 0,20 m/s ² | 0,33 m/s ² |

Longitudes mínimas de alineaciones de curvatura constante

Se adopta como criterio general una longitud mínima en metros de 0,5·Vmáx, salvo en el caso de recta entre curvas de distinto signo de curvatura que será 0,5·Vmáx ó 0.

Alzado

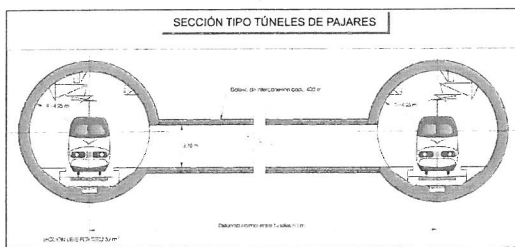
Los criterios que se adoptan en alzado son los siguientes:

Tabla 3. Parámetros en condiciones normales y excepcionales

| | Normal | Excepcional |
|---|-----------------------|-----------------------|
| Pendiente longitudinal máxima en vía general (P. máx) | 20‰ | 20‰ |
| Pendiente longitudinal mínima en túneles y trincheras | 5‰ | 2‰ |
| Aceleración vertical máxima (Av. máx) | 0,22 m/s ² | 0,44 m/s ² |
| Longitud mínima de acuerdo o pendiente constante | 0,5 · Vmáx | 0,5 · Vmáx |

Por otro lado, tratándose en este caso de un trazado en túneles, es preciso racionalizar la sección del mismo, estableciéndose la razonablemente económica que permita aglutinar las necesidades de sostenimiento y revestimiento del macizo rocoso, además disponer de los gálibos necesarios para las instalaciones de catenaria, de seguridad y comunicaciones, la acción aerodinámica de los trenes, los elementos de drenaje y andenes de mantenimiento, aparte de la propia superestructura de vía.

Figura 2. Sección transversal de los Túneles de Pajares



3. SISTEMAS DE GUIADO EMPLEADOS EN LOS TÚNELES DE PAJARES

Debido a los condicionantes que afectan al trazado, es de vital importancia el aseguramiento de que la geometría diseñada de los túneles se materializa durante la ejecución de los mismos, quedando escaso margen para el error, máxime cuando en el proyecto se divide en varios contratos con diferentes tuneladoras gobernadas por equipos distintos.

Durante el avance de la tuneladora es fundamental conocer constantemente la posición real de ésta en relación al eje teórico. Únicamente controlando la posición en todo momento se pueden corregir a tiempo desviaciones no deseadas de la máquina.

La desviación de la tuneladora respecto al trazado teórico depende de varios factores,

fundamentalmente de la consistencia de la roca: dura o blanda. También es afectada por la fuerza centrífuga, igual que a un vehículo que describe una curva. Al depender ésta de la masa, no se debe desestimar en máquinas de esta envergadura. Por otro lado, en trazados con radios pequeños es necesaria una corrección de trayectoria más fuerte, y por consiguiente más difícil de obtener que en trazados rectos.

Si se utilizan para la construcción anillos de forma trapezoidal, lo anteriormente dicho crece en relevancia. Si se monta una configuración de anillo errónea, la tuneladora se alejará del trazado nominal deseado. También la corrección de esta desviación será más difícil.

Las tuneladoras que han intervenido en la ejecución de los túneles de Pajares emplean dos sistemas de guiado comerciales:

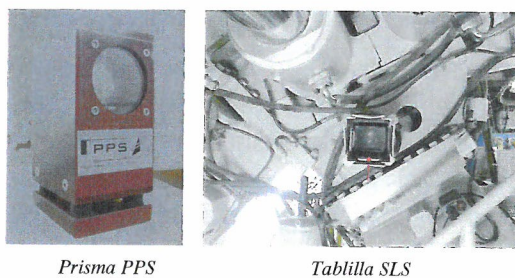
- El sistema SLS-T APD de VMT GMBH, en las dos tuneladoras HK.
- El sistema PPS de Poltinger Precisión Systems en las dos NFM y en la MDF.

3.1. Funcionamiento básico de los sistemas de guiado

La base de ambos sistemas es prácticamente la misma: la determinación de la posición, orientación y tendencia de la cabeza de la tuneladora. Para el cálculo de estos valores nos ayudamos de puntos conocidos implantados en el túnel, referencias solidarias con la propia máquina instaladas en el escudo de la misma (tablilla láser o prismas) y de una estación total robotizada fijada al hastial del túnel ya construido. Además, un inclinómetro toma constantemente lecturas del estado de giro transversal y de inclinación longitudinal. Estos datos son transmitidos al ordenador de mando, con una cadencia de fracción de segundo, que determina exactamente la posición, orientación y tendencia de la cabeza de la tuneladora en el espacio, comparándolos con los que correspondería

al trazado teórico, registrando esta información, presentándola en una pantalla en la cabina de control, a la vista del piloto, y transmitiéndola por el sistema de comunicaciones del túnel para ser visualizada en tiempo real en las oficinas de obra, o en cualquier otro lugar, a través de Internet.

Figura 3. Elementos de posición de los sistemas de guiado.



Prisma PPS

Tablilla SLS

Figura 4. Esquema básico del sistema SLS

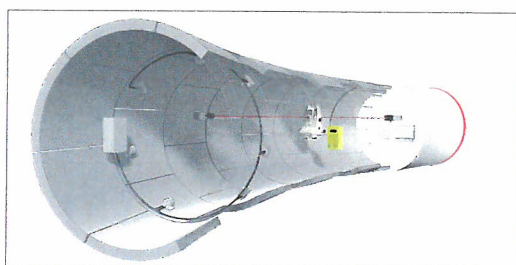
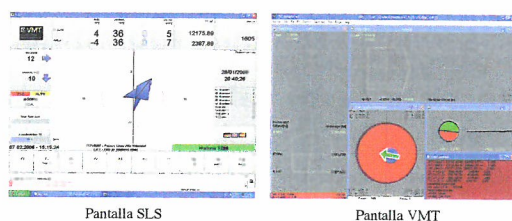


Figura 5. Pantallas de visualización de los parámetros de guiado



Pantalla SLS

Pantalla VMT

Figura 6. Estación fijada al hastial y operadora de guiado en su puesto



3.2. Trabajos geodésicos y topográficos

Es necesario disponer de puntos fijos de coordenadas conocidas dentro del túnel a medida que la tuneladora avanza en la perforación, para que los sistemas de guiado marquen la geometría correcta. Para ello se requieren una serie de trabajos geodésicos y topográficos, que se describen a continuación:

Red exterior

La primera labor que se acomete antes de empezar la obra es la comprobación de la cartografía existente, así como el diseño, monumentación, cálculo y compensación de la Red Topográfica. Una vez se analizó el anejo topográfico incluido en el proyecto, se observó la conveniencia de diseñar una nueva Red que enmarcase la zona de actuación con la mayor garantía posible, y densificarla en las inmediaciones de las bocas, en adelante Red de bocas de túneles. Para ello se imponen las siguientes condiciones:

- Materializar tres redes perfectamente enlazadas entre sí y enmarcadas en el marco de referencia anteriormente mencionado, en las proximidades de las bocas de entrada a los túneles.
- Proyectar la distancia entre vértices de cada red entre 800 m y 1.500 m.
- Intervisibilidad entre los vértices de cada red de bocas.
- Monumentación adecuada a éste tipo de obras (hitos de hormigón con centrado forzado).
- Cada Red de bocas estará constituida por, al menos, cuatro vértices, uno de los cuales constituirá el polo de entrada a los diferentes túneles.
- Diseño de una metodología de observación unificada y homogénea, en la que se incluye instrumentación a utilizar, series a realizar y tiempos de observación que nos garanticen la calidad de dicha observación en cada uno de los frentes de ataque.

A partir de las condiciones anteriormente enumeradas se elabora el siguiente plan de actuación:

1. Observación mediante técnicas GPS con receptores bifrecuencia geodésicos.
2. Utilización del método estático con cálculo en postproceso que garantice la mayor precisión.
3. Tiempo de observación de mínimo de tres horas, que minimice sistematismos en la configuración de la constelación de satélites.
4. Enlace con la Red Geodésica Nacional a partir de los vértices: ROI y REGENTE: Bildeo (901), Renorios (902), Bustallal (903), Matona (904), Vallinas (905), Corullos (951), Pico Boya (952) y Negrones (953).
5. Diseño de una observación que permita tener fiabilidad en las coordenadas de los puntos, y redundancia de las coordenadas de los vértices.

Los vértices en la boca norte (Pontones, Asturias) están numerados del 101 al 104. Los vértices de la boca intermedia (Folledo, León), están numerados del 201 al 204 y los vértices de la boca sur (Pola de Gordón, León) están numerados: 301, 302, 303 y 305.

La observación se realizó durante los días 29, 30 de Septiembre y 1, 2, 3 de Octubre del año 2004 con seis receptores bifrecuencia como se muestra en la tabla 3.

Hasta la llegada de la tecnología GPS la forma de transmitir orientación entre las bocas de túneles era a partir de observaciones por métodos clásicos, casi siempre manuales y tediosos, lo que llevaba a una pérdida de precisión que venía repercutiendo en los cales.

Figura 7. Monumentación en vértice de entrada a boca de ataque



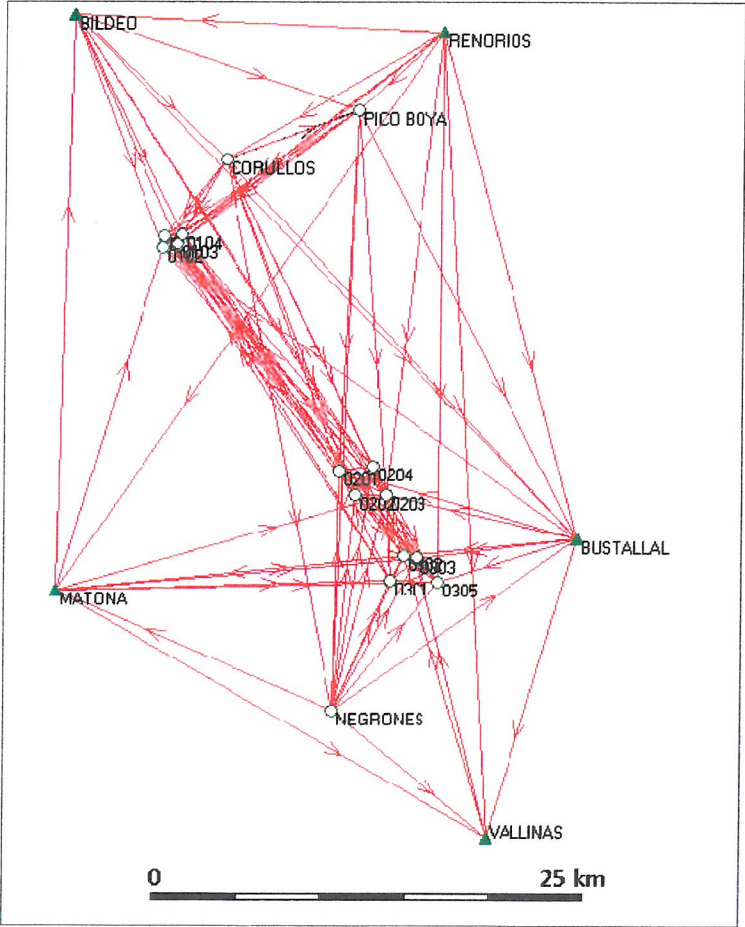
Tabla 3. Diagrama de sesiones de observación de la campaña GPS

| Sesión | Vertices observados | | | | | |
|--------|---------------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----|
| 1 | Bildeo | Renorios | Corullos | Pico Boya | 103 | 104 |
| 2 | Corullos | Pico Boya | 101 | 102 | 103 | 104 |
| 3 | Bustallal | Corullos | Pico Boya | Negrones | 201 | 203 |
| 4 | Corullos | Negrones | 201 | 202 | 203 | 204 |
| 5 | Bustallal | Matona | Vallinas | Negrones | 302 | 303 |
| 6 | Matona | Negrones | 301 | 302 | 303 | 305 |
| 7 | 102 | 103 | 201 | 203 | 301 | 303 |
| 8 | 101 | 103 | 201 | 203 | 301 | 303 |
| 9 | Bildeo | Renorios | Bustallal | Matona | Vallinas | 102 |
| 10 | Bildeo | Renorios | Bustallal | Matona | Vallinas | 203 |
| 11 | Bildeo | Renorios | Bustallal | Matona | Vallinas | 305 |

La gran ventaja de las técnicas GPS respecto a los métodos clásicos de observación es que nos permite determinar perfectamente el acimut entre puntos que no son visibles, separados decenas de kilómetros, por lo que los errores no se acumulan. Éste es el motivo por el cual se ha extendido el uso de estas técnicas aplicadas en proyectos de ingeniería civil.

A partir de los ficheros de observación se procedió al cálculo de las líneas-base utilizando el programa SKI-PRO de LEICA. Para dicho cálculo se utilizaron las efemérides precisas IGS, que garantizan una precisión en las posiciones de los satélites mejor de cinco metros.

Figura 8. Red de enlace con la Red Geodésica Nacional

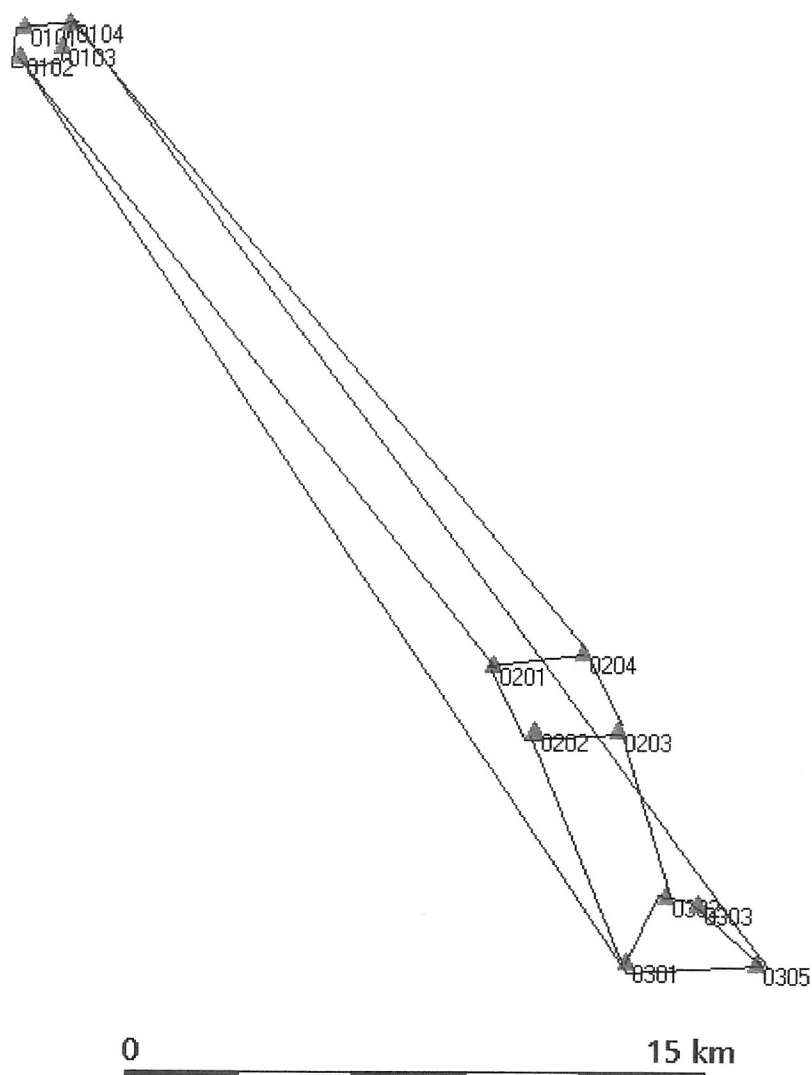


Con las líneas-base calculadas, tras comprobar que no existían errores groseros en las observaciones y analizar los errores de cierre, se procedió mediante el programa GEOLAB a la compensación de la red. Las elipses de error obtenidas, al 95% de intervalo de confianza, están por debajo de 1 cm, como se puede comprobar en la tabla 4.

Tabla 4. Coordenadas obtenidas de los vértices

| Vertice | Latitud | Longitud | Altura Elips. |
|-----------|------------------|------------------|------------------|
| | ² (m) | ² (m) | ² (m) |
| 101 | N 43 1 30.49577 | W 5 50 24.49944 | 690.206 |
| | 0.003 | 0.003 | 0.003 |
| 102 | N 43 1 9.82545 | W 5 50 28.18001 | 829.595 |
| | 0.003 | 0.003 | 0.003 |
| 103 | N 43 1 17.17141 | W 5 49 49.61426 | 848.000 |
| | 0.003 | 0.003 | 0.003 |
| 104 | N 43 1 33.68953 | W 5 49 41.60397 | 905.063 |
| | 0.003 | 0.003 | 0.003 |
| 201 | N 42 54 8.79002 | W 5 4 54.99967 | 1471.146 |
| | 0.003 | 0.003 | 0.003 |
| 202 | N 42 53 22.93267 | W 5 42 16.39381 | 1457.319 |
| | 0.003 | 0.003 | 0.003 |
| 203 | N 42 53 23.37593 | W 5 40 57.29589 | 1226.028 |
| | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| 204 | N 42 54 16.80775 | W 5 41 30.45889 | 1460.740 |
| | 0.003 | 0.003 | 0.003 |
| 301 | N 42 50 42.47085 | W 5 40 47.43989 | 1224.153 |
| | 0.003 | 0.003 | 0.003 |
| 302 | N 42 51 27.93574 | W 5 40 10.72729 | 1148.030 |
| | 0.003 | 0.003 | 0.003 |
| 303 | N 42 51 22.48001 | W 5 39 39.91327 | 1227.335 |
| | 0.003 | 0.003 | 0.003 |
| 305 | N 42 50 40.50697 | W 5 38 44.98602 | 1132.160 |
| | 0.003 | 0.003 | 0.003 |
| Bildeo | N 43 8 27.68414 | W 5 54 14.39435 | 1298.382 |
| Bustallal | N 42 52 2.77576 | W 5 32 51.31698 | 1432.779 |
| Corullos | N 43 3 56.10098 | W 5 47 48.78124 | 1373.905 |
| | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| Matona | N 42 50 24.74635 | W 5 54 54.84868 | 1571.433 |
| Negrones | N 42 46 38.74467 | W 5 43 9.25217 | 1373.471 |
| | 0.003 | 0.003 | 0.003 |
| Pico Boya | N 43 5 29.10004 | W 5 42 8.80730 | 1785.287 |
| | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| Renorios | N 43 7 53.89877 | W 5 38 33.38436 | 1390.095 |
| Vallinas | N 42 42 38.91640 | W 5 36 38.55234 | 1140.781 |

Figura 9. Red de enlace entre las bocas de ataque



En el año 2006 se realizó una nueva campaña de observación de la Red exterior para dotar de coordenadas a nuevos vértices con los que se tuvo que ampliar dicha Red, fundamentalmente debido a que al haberse implantado las instalaciones exteriores accesorias a las tuneladoras, algunas de las visuales de la primitiva Red se eclipsaron, aprovechándose también la actuación para analizar si se habían producido movimientos de los vértices de la red primitiva por posibles desplazamientos de las laderas donde estaban ubicados. En la tabla 5 se muestra la comparación de las coordenadas obtenidas en la primera y segunda campaña:

Tabla 5. Diferencias de coordenadas entre las campañas GPS

| Vertice | Diferencias longitud (m) | Diferencias latitud (m) |
|---------|--------------------------|-------------------------|
| 102 | -0.007 | 0.000 |
| 103 | 0.007 | 0.006 |
| 104 | -0.004 | 0.006 |
| 201 | 0.007 | -0.001 |
| 202 | 0.004 | -0.004 |
| 203 | 0.007 | 0.001 |
| 204 | 0.007 | -0.010 |
| 301 | 0.003 | -0.004 |
| 302 | 0.000 | 0.000 |
| 303 | 0.000 | 0.011 |
| 305 | 0.003 | 0.005 |
| 2001 | 0.002 | -0.001 |
| 3001 | 0.003 | -0.003 |
| 3002 | -0.006 | -0.009 |
| 3004 | 0.004 | 0.001 |
| 3005 | -0.003 | 0.006 |
| 3006 | 0.000 | 0.003 |

Se aprecia que las diferencias obtenidas entre la primera y segunda campaña están en el rango del centímetro, es decir, están dentro del rango de precisión tanto de la instrumentación como de la metodología utilizada.

Las coordenadas obtenidas de la Red, mediante técnicas GPS, deben ser transformadas al sistema oficial en España ED50, en el cual se realizó el proyecto constructivo, lo que lleva a una pérdida de precisión de la Red calculada. Al intentar encajar las observaciones GPS en el sistema oficial, y al ser éste menos preciso que el sistema GPS WGS84 (ETRS89), se obliga a la eliminación de vértices geodésicos que deben intervenir en el cálculo de la transformación, eligiéndose sólo aquellos que, además de formar una buena configuración geométrica, hacen mínimos los residuales de los parámetros de transformación calculados. En resumen, la calidad de las coordenadas obtenidas mediante técnicas GPS empeora al intervenir las coordenadas de los vértices geodésicos en el sistema ED50 para realizar la transformación. Este problema viene siendo habitual en todos los proyectos que han sido redactados referidos a ED50, aunque se puede controlar el alcance de esta pérdida de precisión.

Si se quieren transformar las coordenadas al sistema ED50, existen varios métodos matemáticos para realizar dicha transformación. En nuestro caso el método elegido es el denominado Regresión Paso a Paso, el cual realiza una transformación Helmert previa en 3 dimensiones, posteriormente una transformación Helmert planimétrica, y un por último un ajuste altimétrico, lo que nos permite poder considerar por separado puntos en transformación planimétrica y puntos en transformación altimétrica, adaptándose a la propia naturaleza del sistema ED50.

Tabla 6. Parámetros de transformación de datum, precisiones y residuos

| Parametros de transformación de datum paso a paso | | | |
|--|-----------------------|-------------|--------|
| Sistema origen | ETRS 89 | | |
| Elipsoide | SGR 80 | | |
| Sistema destino | ED 50 | | |
| Elipsoide | International Hayford | | |
| Modo de altura | Ortométrica | | |
| 1.º Paso: Transformación 3D-Helmert previa | | | |
| Número de puntos comunes | 8 | | |
| Origen de rotación | Parámetro | Valor | Unidad |
| | X0 | 4648859.634 | m |
| | Y0 | -481202.701 | m |
| | Z0 | 4327702.590 | m |
| Origen de rotación | Parámetro | Valor | Unidad |
| Desplazamiento X | 100.930 | 0.324 | m |
| Desplazamiento Y | 106.143 | 0.324 | m |
| Desplazamiento Z | 127.143 | 0.324 | m |
| | Sigma a posteriori | 0.458 | m |
| 2.º Paso: Transformación 2D-Helmert | | | |
| Número de puntos comunes | 8 | | |
| Origen de rotación | Parámetro | Valor | Unidad |
| | X0 | 273721.2805 | m |
| | Y0 | 4757848.796 | m |
| Parámetro | Valor | — | Unidad |
| Desplazamiento X | -0.182 | 0.017 | m |
| Desplazamiento Y | 0.174 | 0.017 | m |
| Desplazamiento Z | -1.83831 | 0.17358 | m |
| Cambio de Escala | -22.90350 | 0.84150 | ppm |
| Residuos: Vértices | dX | dY | Unidad |
| Bildeo | 0.046 | -0.045 | m |
| Bustallal | 0.000 | 0.000 | m |
| Corullos | -0.031 | 0.010 | m |
| Matona | -0.027 | -0.084 | m |
| Negrones | -0.055 | 0.060 | m |
| Pico Boya | 0.045 | 0.056 | m |
| Renorios | 0.000 | 0.000 | m |
| Vallinas | 0.022 | 0.004 | m |
| 3.º Paso: Transformación de altura por plano regresión | | | |
| Número de puntos comunes | 8 | | |
| Parámetro | | Valor | Unidad |
| Altura en el origen | | -55.143 | m |
| Inclinación de altura en eje X | | 0.00197 | grado |
| Inclinación de altura en eje Y | | 0.00172 | grado |
| Media de la precisión de la transformación | | 0.091 | m |
| Residuos: Vértices | dX | dY | Unidad |
| Bildeo | Pos+Alt | -0.100 | m |
| Bustallal | Altura | 0.000 | m |
| Corullos | Posición | 0.010 | m |
| Matona | Pos+Alt | 0.068 | m |
| Negrones | Posición | 0.000 | m |
| Pico Boya | Posición | 0.000 | m |
| Renorios | Altura | 0.111 | m |
| Vallinas | Posición | 0.000 | m |

Por otro lado, la Red Geodésica de España, es una Red eminentemente planimétrica, y aunque todos los vértices de dicha Red tienen componente altimétrica, cuando se quiere conocer con precisión la altitud se ha de acudir a la Red de Nivelación de Alta Precisión (RNAP). Si a esto añadimos que con el sistema de medida GPS las alturas que obtenemos son elipsoidales y no ortométricas, concluimos que el sistema de medida GPS es muy preciso cuando hablamos únicamente de planimetría, ya que para obtener altitudes ortométricas a partir de las altitudes elipsoidales se debería contar con un modelo de geoide preciso, no disponible aún, hoy en día.

Como resumen: las coordenadas que obtengamos, serán válidas para planimetría, siendo necesario hacer nivelaciones, partiendo de clavos de la Red Nacional de Nivelación, para obtener altitudes con precisión suficiente para que el cale en altimetría de los túneles esté dentro de la precisión exigida.

De lo anteriormente expuesto, se puede concluir:

1. Las coordenadas obtenidas mediante técnicas GPS se han transformado al Sistema ED50 y llevado al plano utilizando la proyección UTM, utilizada en el proyecto.
2. La altitud se habrá de obtener por técnicas de nivelación geométrica de Precisión.
3. Como consecuencia de la pérdida de precisión en las coordenadas debido a la transformación entre sistemas de referencia, habrá que realizar un estudio para analizar si dicha pérdida de precisión puede ó no afectar a la requerida para la ejecución de la obra. Para ello se ha realizado un estudio comparativo entre acimutes utilizando las coordenadas UTM ETRS89 (obtenidas directamente con GPS) y UTM ED50 (transformadas).

Tabla 7. Diferencia entre acimutes y ángulos entre ETRS89 y ED50

| Dirección Estaciones | Acimut ETRS89 (g) | Acimut ED-50 (g) | Diferencia segundos |
|----------------------|-------------------|------------------|---------------------|
| 101-102 | 208.2708 | 208.2717 | -8.6 |
| 101-102 | 130.5521 | 130.5528 | -7.1 |
| 101-104 | 93.5570 | 93.5577 | -6.5 |
| 201-202 | 164.7110 | 164.7115 | -4.6 |
| 201-203 | 130.7535 | 130.7540 | -5.2 |
| 201-204 | 91.8235 | 91.8240 | -5.9 |
| 301-302 | 34.1250 | 34.1253 | -2.8 |
| 301-303 | 56.8341 | 56.8343 | -2.5 |
| 301-305 | 101.3744 | 101.3748 | -4.3 |
| 302-303 | 115.0315 | 115.0321 | -5.9 |
| 101-201 | 159.0928 | 159.0934 | -5.6 |
| 101-301 | 163.0538 | 163.0544 | -5.2 |
| 201-301 | 172.8165 | 172.8169 | -4 |
| 102-101-103 | 77.7187 | 77.7188 | -1.5 |
| 202-201-203 | 33.9575 | 33.9574 | 0.6 |
| 301-303-305 | 44.5403 | 44.5405 | -1.9 |

La mayor diferencia se aprecia en el lado 101-102 debido a que es la distancia más corta entre vértices. Si asignamos al menor valor encontrado el valor cero, se aprecia que la diferencia es del orden de 6 segundos centesimales en el caso más desfavorable.

Analizando los parámetros de transformación entre el sistema de observación y el sistema en el cual trabajamos (ED50) se aprecia que existe un factor de escala de 23 partes por millón, el cual habrá que tener en cuenta cuando se realicen las observaciones de redes en el interior de los

túneles, debiéndose corregir de estas partes por millón las distancias obtenidas por medios convencionales (estaciones totales), para llevarlas al sistema adoptado.

En cuanto a la obtención de la tercera coordenada de los vértices de las redes de bocas, como se ha comentado en párrafos anteriores, se determina a partir de la Red de Nivelación del Instituto Geográfico Nacional, mediante nivelación geométrica.

Redes de guiado interiores en los túneles

Los principales problemas que se plantean a la hora de transmitir las observaciones desde la red exterior de bocas al interior de los túneles son los siguientes:

- a) En el interior del túnel se cuenta con un flujo gaseoso laminar coaxial a una cierta velocidad que tiende a estabilizar los gradientes térmicos horizontales y verticales.
- b) El flujo estabilizado proveniente del interior choca con la atmósfera exterior no estabilizada porque, al margen de otras inclemencias, sufre un ciclo diario. Las turbulencias así generadas influyen muy negativamente en la transmisión de dirección desde el exterior al interior.

Por lo citado anteriormente, la solución ideal sería hacer termografías de exterior e interior y programar las observaciones en los momentos en los que coincidan las condiciones exteriores e interiores. En el ámbito práctico se han buscado momentos en los que la temperatura del interior del túnel es muy similar a la del exterior, practicándose sucesivas transmisiones de orientación en estas circunstancias, analizando las posibles divergencias.

En cuanto al diseño de la red en el interior de los túneles se puede comentar lo siguiente:

- a) A partir de las conclusiones de los trabajos realizados en los Túneles de

Guadarrama, se ha optado por fijar lados de 250 m de longitud, distancia que da un buen rendimiento, con una estimación de errores angulares aceptable para el caso de los túneles.

- b) Para minimizar el efecto de refracción, se han realizado visuales cruzadas sobre el eje del túnel de un hastial a otro, lo cual reduce la influencia de dicho efecto.
- c) Las monumentaciones del interior del túnel están constituidas por consolas de acero firmemente ancladas a los hastiales, dotadas con plataformas perfectamente niveladas y tornillos de bronce de 5/8", para el estacionamiento de los equipos.
- d) Las señales para los puntos de altimetría son pernos metálicos anclados al revestimiento.

Para el diseño de la observación de las redes en el interior de los túneles hay que considerar dos metodologías independientes para planimetría y altimetría.

Planimetría

La observación presenta tres facetas: medida de distancias, de ángulos y de acimutes giroscópicos. Las dos primeras se realizan con una estación total servo-asistida, con seguimiento de prisma y puntería automática, cuya precisión nominal es de 1" para los ángulos y 1 mm +1 ppm para distancias.

Medida de distancias

Con el instrumental debidamente verificado y las correcciones adecuadas por parámetros meteorológicos, no plantea dificultad. En cuanto al número de veces que hay que medir cada distancia, dado que la medición angular es muy reiterativa, al asociar automáticamente una lectura angular con una de distancias, el aspecto distanciométrico es superabundante. Por otro lado, el sistema de puntería automática es plenamente eficaz.

En cada medida se aplicarán la corrección por parámetros meteorológicos, con expresa exclusión de cualquier otra, como la de escala por proyección, factor de escala de la transformación, altura o la de coeficiente K de refracción, que queda minimizado en el proceso de cálculo.

Medida de ángulos

Las mediciones se realizan con el programa de «medición de series» del aparato, con la técnica de vuelta de horizonte. Para hacer una vuelta de horizonte se hace lectura acimutal visando a uno de los puntos, que se denomina referencia. Después se visan y hacen lecturas a los restantes para finalmente volver a visar a referencia, haciendo la lectura de cierre. Una serie se define como una vuelta de horizonte en posición directa (CD) y otra en posición inversa (CI) tal como se ha descrito. Un bloque se define como un número de cinco series repetidas.

Una vez realizadas las series se calculan «in situ» los ángulos y distancias medios además de la desviación estándar de la serie y de una medida aislada en ángulos horizontales, verticales y distancias. Si la desviación estándar es mayor de 5cc se rechaza la serie. Si la desviación estándar entre series es mayor de 5cc se repiten dos más, rechazándose la de mayor y la de menor. Si entonces se cumple la tolerancia mencionada, queda aceptada la observación; si no probablemente las condiciones de visibilidad y de contaminación atmosférica del túnel son desfavorables, siendo aconsejable suspender la observación y dejarla para otro momento más propicio.

Como al visar a cada punto se asocia una lectura de distancia con la de ángulos, la poligonal es superabundante en el aspecto distanciométrico. Debe considerarse que repetir muchas observaciones en un breve período de tiempo puede dar una engañosa sensación de precisión, ya que la repetibilidad del instrumento suele ser mejor que su precisión real. Sólo se puede considerar una obser-

vación repetida si ambas se han hecho en diferentes condiciones de observación o, al menos, en momentos distintos. Esta consideración va encaminada a no crear redundancias ficticias con observaciones muy agrupadas en un instante determinado del proceso de obra que poco aportan sobre una aislada.

Cuando se trabaja en túneles de grandes longitudes, las dos principales fuentes de error son: la refracción lateral y el producido por la transmisión del acimut dentro del túnel debido a la gran cantidad de estacionamientos que se tienen que realizar. El primer problema se minimiza, como ya hemos comentado, diseñando una metodología de observación con las estaciones totales. El segundo problema se minimiza a partir del control del acimut mediante un giróscopo. En los Túneles de Pajares se ha utilizado un giroteodolito compuesto de un giroscopio GYROMAT 2000 DMT y una estación total LEICA TCA 2003. El giroscopio es de seguimiento automático, con una precisión nominal máxima de 10cc y registro interno de observaciones. Su constante no es un ajuste sino una característica mecánica. Es la diferencia entre el Norte giroscópico y el Norte geográfico o rotacional terrestre. Debe hacerse un seguimiento de su evolución, con verificaciones periódicas.

Para el cálculo de la constante se tienen que comparar acimutes astronómicos con acimutes obtenidos por el giróscopo, cómo dentro del túnel no podemos determinar acimutes astronómicos, lo que realmente se compara son acimutes geodésicos con acimutes giroscópicos, por lo que se asume que la desviación relativa de la vertical permanece constante en el interior del túnel. Para asumir dicha hipótesis, lo que se ha determinado es la constante del giróscopo en las tres embocaduras, analizando si las diferencias obtenidas están o no dentro del rango de precisión del instrumento. En nuestro caso, se supone que la fuente de error, debido a no tener en cuenta la desviación de la vertical, no es significativa, por lo que se ha asumido una constante única para el giróscopo en todo el túnel.

Altimetría

En lo que sea aplicable a las condiciones e instrumentación con las que se ha de realizar este trabajo, se han seguido las normas de Nivelación de Alta Precisión del Instituto Geográfico Nacional (IGN). La tolerancia genérica, error kilométrico, está establecida para grandes líneas en $\pm 1,5 \text{ mm } \sqrt{K}$, siendo K la longitud de la línea nivelada, expresada en km. La distancia máxima entre instrumento y mira no ha superado los 30 m, para compensar la esfericidad terrestre, la refracción vertical y la falta de horizontalidad del eje de colimación, se emplea el método del punto medio, con tolerancia de equidistancia de 10 cm.

Se ha tenido en cuenta, además, que en un túnel en el que la refracción vertical puede cobrar un indeseado protagonismo, la figura de observación exige que las visuales de espaldas y frente sean especularmente simétricas respecto al plano normal al eje del túnel que pase por el instrumento.

Finalmente, aunque se han observado anillos, es favorable que haya una redundancia observacional añadida, lo que se consigue duplicando señales. Esto significa que los clavos de nivelación van normalmente agrupados por parejas. Una ventaja añadida es la inmediata la comprobación de un hipotético movimiento no controlado de una señal. En función de la distribución de las estaciones planimétricas, la forma lógica de distribuir las parejas de clavos de nivelación es poniendo siempre una cerca de las estaciones planimétricas, y tres parejas más entre estaciones contiguas. De esta forma, de estación a estación se hacen cuatro niveladas, con distancias nivel-mira de unos 25 m, valor muy equilibrado entre rendimiento y precisión.

Se utilizaron niveles electrónicos LEICA DNA03, que hacen lectura digital sobre un código de barras presentado en una lámina invar. Estos instrumentos necesitan una iluminación uniforme y de cierta composición cromática concreta (temperatura de color). Pueden plantearse problemas de iluminación, pero hay varias opciones, todas ellas

eficaces, aunque en obra, con acometida eléctrica, se suele resolver por el contundente método de usar un foco de 1000 W iluminando la lámina de invar a una cierta distancia.

Para poder hacer el cálculo de las altitudes ortométricas a partir de los desniveles geométricos medidos hay que disponer de valores de gravedad. Las medidas se han realizado por el Instituto Geográfico Nacional.

Cálculo de las redes interiores de guiado

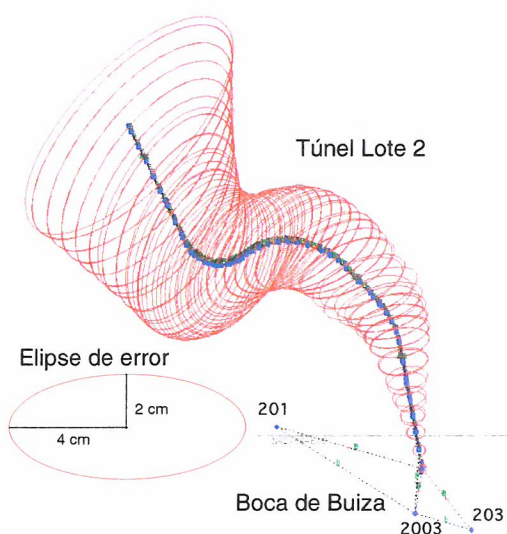
Como ya se ha comentado, a cada una de las máquinas tuneladoras le sigue por el túnel ya ejecutado una Red topográfica interna que, entre otras acciones, persigue su guiado con el grado de precisión necesario.

También se ha comentado que estas redes están observadas, en su componente planimétrica, con estación total robotizada midiendo ángulos y distancias además de acimutes giroscópicos, realizados con giróscopo, que toma como referencia la dirección el eje de giro de la Tierra. Su parte altimétrica se determina con observaciones de nivelación de precisión.

El diseño geométrico de estas redes, dentro del túnel, sigue un desarrollo peculiar y tiene unas características tales que todos los textos de topografía de precisión aconsejan evitar. Sin embargo es el único posible, dada la configuración de la realidad de la obra. Las redes parten de unos puntos de control en la boca de cada túnel y se adentran dentro de él cosiendo literalmente todas sus estaciones a base de las observaciones topográficas comentadas. Con esta Red se va guiando a la tuneladora y en ningún momento la red vuelve a tener ningún tipo de comprobación sobre otros puntos de control. Esto es debido a que no existirán hasta no haber salido por otra de las bocas, calado, o bien, hasta no haber enlazado con el túnel paralelo, realizado con otra tuneladora, a través de una galería de evacuación.

Por todo ello y mientras no se salga del túnel por el otro extremo, o se enlace con otro túnel, las Redes topográficas internas de guiado no tienen más control que los puntos externos de partida de cada boca. Al realizar un estudio teórico de propagación de errores, a medida que la red va avanzando detrás de la tuneladora, las precisiones teóricas obtenidas en el cálculo de sus coordenadas van empeorando de forma exponencial.

Figura 10. Elipses de error y su aumento con la distancia a la boca de ataque



Al ir construyendo, a la vez que se perfora, algunas de las galerías de evacuación que conectan con el otro túnel que discurre paralelo, se unen las dos redes. En éste caso, aunque se dispone de comprobaciones, hay que tener especial cuidado tanto en la observación como en el cálculo del enlace por las galerías, debido al deterioro de la consistencia geométrica de la red que ello conlleva.

Tan importante como el cálculo y ajuste de las coordenadas de cada una de las estaciones que tienen estas redes internas es el perfecto análisis de los errores encontrados en ellas y su fiabilidad, que realmente indica en todo momento el grado de incertidumbre con el que cada una de las tuneladoras avanza. Para ello el cálculo y ajuste de todas estas observaciones se realiza empleando

el método de mínimos cuadrados y, paralelamente al cálculo de coordenadas, se van obteniendo sus desviaciones estándar y las elipses de error planimétricas, o zonas de incertidumbre, con un grado de confianza del 95%.

El análisis de los errores, y por tanto de la fiabilidad de los resultados que se iban obteniendo sigue varias fases:

1. Elección de la instrumentación adecuada en función de la estimación de sus errores: estación total para ángulos y distancias, giróscopo para los acimutes y niveles de precisión para los desniveles. Además, cada uno de estos instrumentos observa un protocolo de calibración a lo largo de todo el proceso constructivo.
2. Análisis y estimación a priori de los errores que se obtendrán con la metodología de observación seguida a lo largo de los túneles.
3. La metodología de observación lleva consigo, dentro del túnel y antes de abandonarlo, un chequeo de calidad de las series de observaciones obtenidas, procediendo en su caso a su repetición.
4. Comprobación de que, una vez compensada la red por mínimos cuadrados, los residuos que dejan las observaciones realizadas siguen un patrón parecido al de una distribución normal. En esta fase se procede a un segundo rechace de observaciones susceptibles de tener un error mayor del a priori esperado y se procede a la adecuada ponderación de los observables. Hay que tener especial precaución en el análisis de dos situaciones importantes:
 - a) En este proceso estocástico se detecta cualquier desplazamiento de la curva de distribución de residuos, lo cual nos pone de manifiesto la aparición de errores sistemáticos en los instrumentos o métodos de observación. Cualquier sistematismo introducido en las redes las haría desplazar la tuneladora a izquierda o

derecha del eje en planimetría, o hacia arriba y abajo en altimetría y, debido a la naturaleza tan peculiar de las redes dentro del túnel, no se pondría de manifiesto hasta comprobar con otro punto de control externo, con el consiguiente perjuicio, pues esto sólo se podría hacer con el túnel ya perforado. Los sistematismos son pues detectados en el propio proceso de cálculo y aislados para que no influyan en el correcto guiado de las máquinas. Finalmente son reducidos, y corregidos en su caso, antes de incorporar las correspondientes observaciones al cálculo.

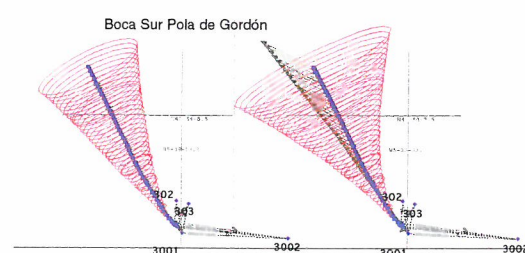
- b) También se comprueba si el patrón de residuos además de que se ajusta a la distribución de Gauss, no constituye una copia escalada de ella. En este último caso, las coordenadas de las estaciones no son alteradas o modificadas, pero sí sus elipses de error que son los elementos que nos dicen la fiabilidad de los resultados. Es tan importante saber dónde se está como saber con qué incertidumbre.

Cuando el avance de las obras ya lo permitió se realizaron las correspondientes comprobaciones con otros túneles ya calados o enlazados a través de las galerías laterales. En estos puntos de enlace, además de la correspondiente elipse o zona de error que cada punto llevaba calculada desde su origen, se obtuvieron las diferencias de coordenadas. Lógicamente los valores de estas diferencias de coordenadas encontradas debían de ser congruentes con las estimaciones a priori de sus errores, lo cual nos pone de manifiesto que el proceso de observación y cálculo de las redes ha seguido un tratamiento adecuado.

Habría que hacer una especial mención a la incorporación a estas redes de las observaciones con giróscopo, sin cuyo concurso posiblemente no se hubiesen producido los mismos resultados de precisión y fiabilidad obtenidos. Las redes de ángulos, distancias y

desniveles se apoyan inicialmente sobre los puntos de partida existentes en cada boca y, a medida que avanzan las observaciones en el túnel, las nuevas observaciones se apoyan sobre las anteriormente realizadas, acumulando por tanto los errores y disminuyendo la precisión y fiabilidad de estaciones de las redes de guiado.

Figura 11. Elipses de error aplicando giróscopo y sin aplicarlo en Lote 1



El hecho de incorporar las observaciones de giróscopo, a pesar de que su precisión debe de ser entre 5 y 8 veces peor que la obtenida con una estación total, hace que además de enlazar las redes de los túneles al marco de referencia terrestre materializado en los puntos de control de las respectivas bocas, se incorpore en diversas estaciones de las redes los acimutes giroscópicos, volviendo en cierto modo a enlazar con el marco de referencia terrestre que propicia la relación indiscutible que tienen los acimutes giroscópicos con el eje de rotación terrestre.

El resultado de este control interno en el túnel sobre el mismo marco de referencia terrestre lleva a que esa acumulación de errores que representan las observaciones de estación total no supere un cierto umbral. Las elipses o zonas de error calculadas para cada una de las estaciones de las redes resultan por tanto menores, ganando en fiabilidad. Además de esta circunstancia, cualquier sistematismo de orientación inicial de las redes del interior de los túneles se hubiese puesto de manifiesto con la incorporación de estas lecturas de acimutes giroscópicos.

En diciembre de 2007 se acabaron de realizar las observaciones topográficas necesarias

para enlazar los túneles 1 y 2, que arrancaron de la boca sur de Pola de Gordón. Estos enlaces se practicaron mediante dos conexiones que eran, hasta aquel momento, las únicas posibles entre los diversos túneles y lotes. El primero de los enlaces une los túneles Este y Oeste del Lote 1 y se realizaron con observaciones entre los anillos 6284 del túnel Oeste y el 6265 del túnel Este.

Los puntos de control utilizados para el enlace entre los dos túneles del Lote 1 se encuentran a una distancia aproximada de la boca de 9,9 km, y la mayor incertidumbre que en aquel momento se llevaba estimada estaba en 8 cm. Por comparación de las coordenadas de estos puntos de enlace obtenidas en los procesos de ajuste de la red topográfica de cada uno de los dos túneles se han calculado las diferencias de calado entre ambos túneles, que se reflejan en la tabla 8.

Tabla 8. Desplazamientos y errores de conexión entre los túneles este y oeste del Lote 1

| Enlace Lote 1 túneles este y oeste | | | | |
|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------|------------|
| Desplazamientos | | | | |
| Estación | Norte (m) ² (m) | Este (m) ² (m) | Altitud (m) | Proyección |
| 2626E | 0.015 | -0.020 | -0.000 | UTM 30 |
| | 0.021 | 0.036 | | |
| 26284O | 0.014 | -0.019 | 0.000 | UTM 30 |
| | 0.021 | 0.036 | | |

| Desplazamientos | | | | |
|-----------------|---------|-------------|------------|------------|
| Estación | Eje (m) | Transv. (m) | Acimut (°) | Proyección |
| 26265E | -0.011 | 0.023 | 333.550 | UTM 30 |
| 26284O | -0.011 | 0.021 | 333.550 | UTM 30 |

Las diferencias o desplazamientos de un túnel sobre otro encontrados son del entorno de 1,5 cm en componente norte (y), con una desviación estándar de 2,1 cm, y de 2,0 cm en componente este (x), con 3,6 cm de desviación estándar, resultados estos calificables como excelentes, aunque esperables dentro del margen de incertidumbre que se llevaba calculado, habida cuenta que se llegó a estos puntos con casi 10 km de desarrollo de red topográfica dentro de los túneles. Se ha calculado, en la misma tabla las componentes de error, en sentido de avance y transversal a los túneles. El desplazamiento en sentido PK es de 1,1 cm mientras que en sentido transversal el desplazamiento no supera los 2,3 cm en el peor de los casos.

Posteriormente también se pudo enlazar el túnel Oeste del Lote 1 con el túnel de acceso desde Buiza del Lote 2, con observaciones entre la galería 24, que une los dos túneles a una distancia aproximada de 10,2 km de la boca del túnel Oeste del Lote 1 y a la altura del anillo 3658 del túnel del Lote 2, con una distancia aproximada de red de 5,5 km desde la boca de entrada intermedia. También por comparación de las coordenadas de estos puntos de enlace obtenidas en los procesos de ajuste de la red topográfica de cada uno de los dos túneles se han calculado las diferencias de calado entre ambos túneles, que se reflejan en la tabla 9.

Tabla 9. Desplazamientos y errores de conexión entre los túneles del Lote 1 y Lote 2 Galería 24

| Enlace Lote 1 túnel oeste y Lote 2 Galería 24 | | | | |
|---|-------------------|------------------|-------------|------------|
| Desplazamientos | | | | |
| Estación | Norte (m) ²(m) | Este (m) ²(m) | Altitud (m) | Proyección |
| FG024D | -0.052 | -0.006 | 0.008 | UTM 30 |
| | 0.020 | 0.027 | | |
| FG024I | -0.048 | -0.005 | 0.009 | UTM 30 |
| | 0.020 | 0.027 | | |

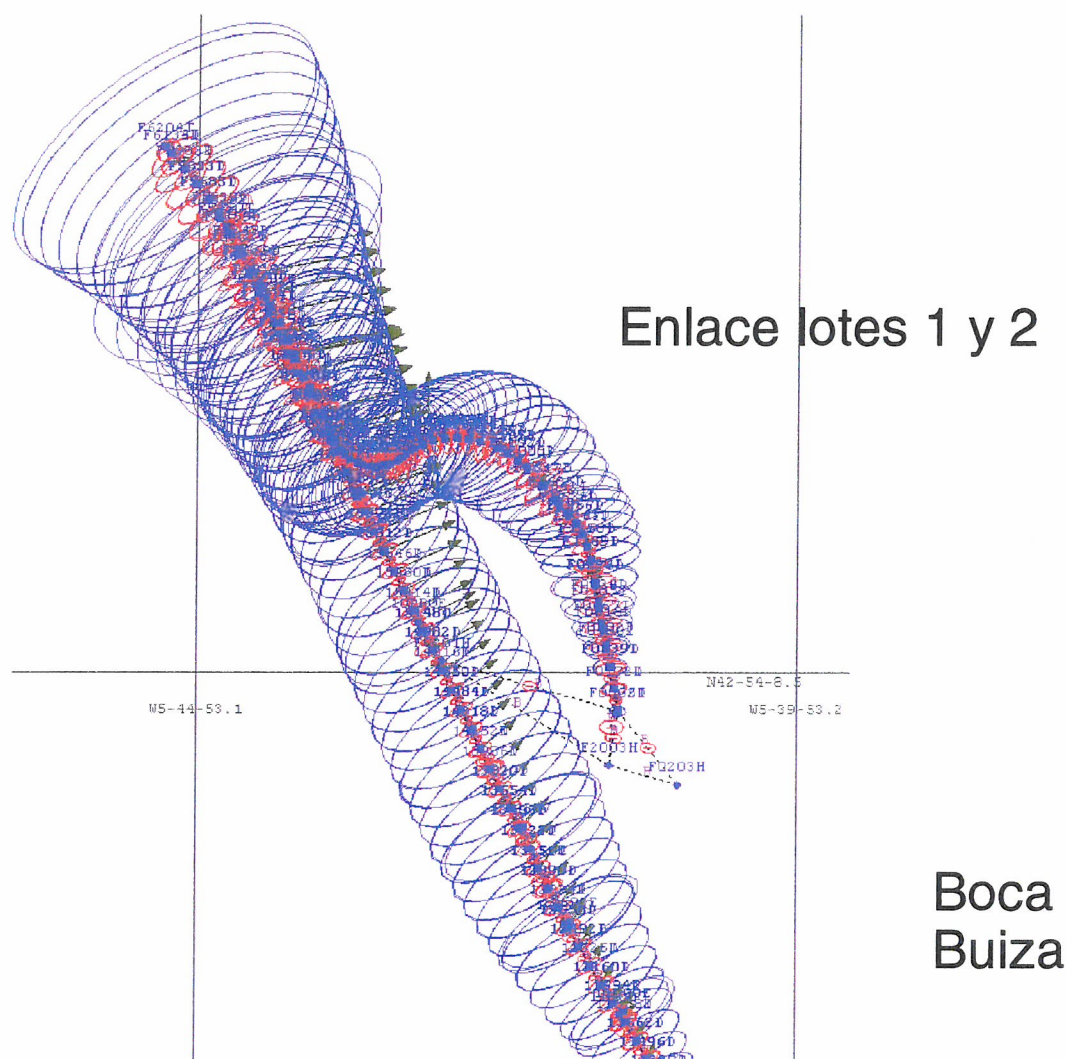
| Desplazamientos | | | | |
|-----------------|---------|-------------|------------|------------|
| Estación | Eje (m) | Transv. (m) | Acimut (°) | Proyección |
| FG024D | 0.044 | 0.029 | 370 | UTM 30 |
| FG024I | 0.040 | 0.026 | 370 | UTM 30 |

Las diferencias o desplazamientos encontrados de un túnel sobre otro son del entorno de 5,2 cm en componente norte (y), con una desviación estándar de 2,0 cm, y de 0,6 cm en componente este (x), con 3,0 cm de desviación estándar, resultados estos calificables también como excelentes, también esperables dentro del margen de incertidumbre, puesto que se ha llegado a estos puntos de control con casi 11 Km. de desarrollo de red topográfica en uno de los túneles, y el otro, con el condicionante de que algunos puntos de control han tenido que superar en el Lote 2 curvas de radios pequeños, generándose lados cortos en la figura, con la consiguiente pérdida de precisión que esto representa para las observaciones topográficas dentro de los túneles.

En la misma tabla se muestran las componentes de error en sentido de avance y transversal a los túneles. El desplazamiento en sentido PK es de 4,5 cm mientras que en sentido transversal el desplazamiento no supera los 3 cm en el peor de los casos.

La diferencia altimétrica encontrada es de 9 mm, cantidad esta también esperable pues la nivelación de precisión que se está observando tiene un error relativo de 1,5 mm por kilómetro de recorrido. El recorrido realizado por las líneas de nivelación, aparte del correspondiente desarrollo dentro de los túneles, se prolonga además hasta las correspondientes señales de Nivelación de Alta Precisión (NAP) del Instituto Geográfico Nacional elegidas como referencias altimétricas para cada uno de los dos túneles.

Figura 12. Red de enlace entre Lotes 1 y 2



Posteriormente se realizó un segundo enlace con observaciones en la Galería 27, entre los puntos 100G27 del lote 1 y los puntos FG027D, FG027I y G4365D del lote 2. Los puntos de control de la galería 27 utilizados para el enlace se encuentran a una distancia aproximada de la boca del lote 1 de 11,5 km y la mayor incertidumbre desde ella está en 7 cm. Desde el túnel de Buiza del lote 2, la galería 27 se encuentra a una distancia aproximada de red de 6,5 km.

Las diferencias o desplazamientos de un túnel sobre otro se han resumido en la tabla adjunta. Los desplazamientos encontrados son del entorno de 5 cm en componente norte (y), con una desviación estándar de 2,3 cm, y de 2,8 cm en componente este (x), con 3,1 cm de desviación estándar, resultados también esperables y dentro del margen de incertidumbre dado que se ha llegado a estos puntos de control con casi 11,5 km de desarrollo de red topográfica en uno de los túneles y el otro.

Tabla 10. Desplazamientos y errores de conexión entre los túneles del Lote 1 y Lote 2 Galería 27

| Enlace Lote 1 túneles este y oeste | | | | |
|------------------------------------|-------------------|------------------|-------------|------------|
| Desplazamientos | | | | |
| Estación | Norte (m) ²(m) | Este (m) ²(m) | Altitud (m) | Proyección |
| 100G27 | -0.05 | -0.027 | 0.034 | UTM 30 |
| | 0.023 | 0.031 | | |
| FG027D | -0.048 | -0.009 | 0.048 | UTM 30 |
| | 0.023 | 0.031 | | |
| FG027I | -0.047 | -0.011 | 0.018 | UTM 30 |
| | 0.023 | 0.031 | | |
| G4365D | -0.055 | -0.028 | -0.034 | UTM 30 |
| | 0.023 | 0.031 | | |

| Desplazamientos | | | | |
|-----------------|---------|-------------|------------|------------|
| Estación | Eje (m) | Transv. (m) | Acimut (°) | Proyección |
| 100G27 | 0.037 | 0.049 | 370 | UTM 30 |
| FG027D | 0.038 | 0.030 | 370 | UTM 30 |
| FG027I | 0.037 | 0.031 | 370 | UTM 30 |
| G4365D | 0.037 | 0.050 | 370 | UTM 30 |

En la misma tabla se muestran las componentes de error en sentido de avance y transversal a los túneles. El desplazamiento máximo en sentido PK es de unos 4 cm mientras que en sentido transversal el desplazamiento no supera los 5 cm en el peor de los casos.

En el momento de la redacción de este texto no se ha podido finalizar el cálculo estricto del enlace entre los contratos norte y sur, aunque uno de los cuales ya se ha realizado con éxito. Las diferencias o desplazamientos de un túnel sobre se encuentran en el entorno de 6 mm en componente norte (y), con una desviación estándar de 2,7 cm, y de 5 cm en componente este (x), con 3,6 cm de desviación estándar, resultados también esperables y dentro del margen de incertidumbre.

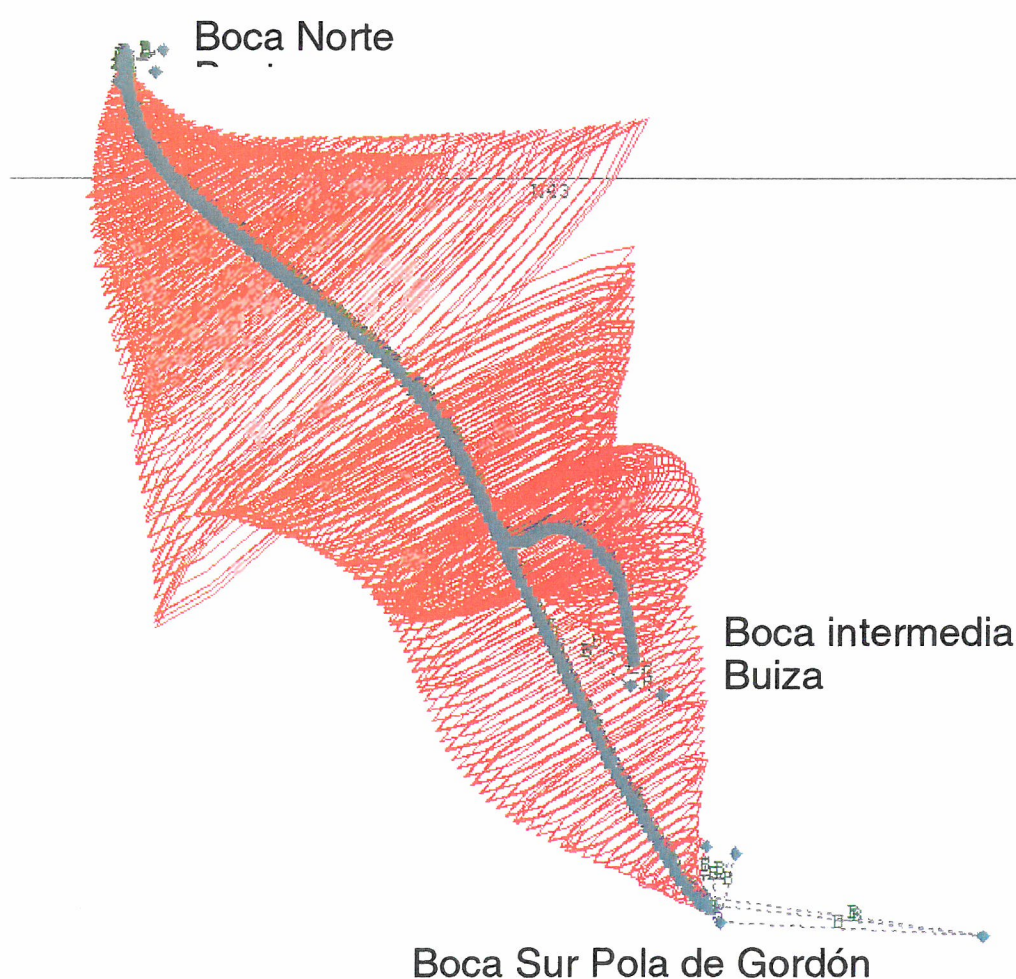
Tabla 11. Desplazamientos y errores de conexión entre los túneles del Lote 1 y Lote 2 Galería 33

| Enlace Lote 1 túnel oeste y Lote 2 galería 33 | | | | |
|---|-------------------|------------------|-------------|------------|
| Desplazamientos | | | | |
| Estación | Norte (m) ²(m) | Este (m) ²(m) | Altitud (m) | Proyección |
| 100G33 | 0.002 | 0.042 | 0.033 | UTM 30 |
| | 0.027 | 0.036 | | |
| FG033D | 0.006 | 0.050 | 0.033 | UTM 30 |
| | 0.027 | 0.036 | | |
| FG033I | 0.006 | 0.046 | 0.037 | UTM 30 |
| | 0.027 | 0.036 | | |
| G6038D | 0.000 | 0.044 | 0.035 | UTM 30 |
| | 0.027 | 0.036 | | |

| Estación | Eje (m) | Desplazamientos | | Proyección |
|----------|---------|-----------------|-----------------------|------------|
| | | Transv. (m) | Acimut ($^{\circ}$) | |
| 100G33 | -0.017 | 0.038 | 370 | UTM 30 |
| FG033D | -0.017 | 0.047 | 370 | UTM 30 |
| FG033I | -0.015 | 0.044 | 370 | UTM 30 |
| G6038D | -0.020 | 0.039 | 370 | UTM 30 |

En la tabla 11 se muestran las componentes de error en sentido de avance y transversal a los túneles. El desplazamiento máximo en sentido PK es de unos 2 cm mientras que en sentido transversal el desplazamiento no supera los 5 cm en el peor de los casos.

Figura 13. Red conjunta de todos los lotes



4. CONCLUSIONES

Como resumen se puede afirmar que las diferencias encontradas en cada uno de los puntos de cada uno de los enlaces realizados confirman un resultado excelente. Comprobadas las desviaciones relativas y elipses que indican el error con que se han determinado estos puntos, se constata que los valores encontrados de los desplazamientos son fiables, esperables y tolerables.

Los errores calculados en los ajustes realizados vienen a ser de magnitud similar a las desviaciones observadas en las coordenadas determinadas los cales, comparando estos ajustes dos a dos,

lo que denota homogeneidad en los resultados de los distintos contratos, al ser las discrepancias similares a las incertidumbres, lo que denota acierto en el modelo de observación y cálculo diseñado.

Las discrepancias en los cales, considerando cada túnel ajustado por separado, y comprobado en los puntos comunes, alcanzan un valor de 5 cm. Este valor también concuerda con los valores que ofrecen las incertidumbres calculadas.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

Proyecto Básico de los Túneles de Pajares.

Proyectos Constructivos de los Túneles de Pajares.

Manual SLS-T APD.

